

潮流作用下复合桥墩局部冲刷研究

倪志辉^{1,2}, 王明会¹, 张绪进^{1,2}

(1. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;
2. 重庆交通大学 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

摘要: 桥墩冲刷是桥梁水毁的重要原因之一, 准确地计算桥墩冲刷深度具有重要意义. 为了比较准确地计算桥墩局部冲刷深度, 结合某跨海大桥, 采用非结构网格技术和大、小模型嵌套的方法建立该大桥海区的平面二维潮流数学模型, 采用潮位、流速、流向等实测资料进行验证. 在此基础上, 对该海区的潮流动力进行了模拟研究, 分析了大桥工程对周围海域的潮流动力影响, 并采用我国行业标准推荐的2种公式以及美国现行规范推荐的公式计算多座跨海大桥桥墩的局部冲刷计算. 结果表明: 大桥工程对桥区附近水域流速和潮位影响不大, 桥墩可能发生最大局部冲刷深度的位置均位于主墩深槽附近.

关键词: 复合桥墩; 局部冲刷; 数学模型; 跨海大桥; 冲刷公式

中图分类号: U442.3⁺2; U443.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2013)02-0045-07

建造在水域中的桥墩会对其附近的水流造成显著影响, 桥墩会引起附近水流状态和泥沙情势发生改变, 这些改变会引起附近水流携带泥沙的能力增强而导致局部冲刷. 随着时间的发展, 桥墩周围的河床由于冲刷而发生变形, 当局部冲刷达到一定深度时会威胁到桥梁结构的安全^[1].

目前河流上的桥墩局部冲刷研究成果较多, 而河口、海湾及海洋里桥墩的局部冲刷研究较少. 在受潮流影响的河口海湾地区, 桥墩局部冲刷系绕过桥墩的马蹄形漩涡所致^[2]. 为避免由桥墩局部冲刷造成的桥梁水毁, 已对桥墩局部冲刷进行了大量的研究. B. W. Melville^[3]在《桥墩冲刷》一书首先回顾了前人的研究成果, B. M. Summer^[4]等人已对这些研究进行了系统回顾和总结. S. E. Coleman^[5]首先对复合桥墩周围局部冲刷的研究进行了回顾, 并对复合桥墩的局部冲刷进行了试验和理论研究, 得到更接近实际的结果.

数值模拟广泛应用于潮流对桥墩影响的研究, 并取得了一定的成果. 其中, 唐士芳等^[6]利用物模与数模相结合的方法, 得出的桩基码头前沿区流速、流向真实, 符合实际, 对计算桥墩局部冲刷有重要的参考价值. 为了研究二维潮流数值模拟中桩基的影响, 导出了二维潮流桩基数模控制方程组, 对潮流进行数值模拟并取得较好效果^[7]. 王晓妹等^[8]以上海近海风电场工程为例, 在长江口、杭州湾大范围二维潮流数学模型中直接模拟小尺度风机墩柱, 研究风机桩群对工程海域的影响, 但由于桩墩局部网格划分不够细致, 导致得到的局部流态结果不太精确. 陈倩等^[9]用三维陆架海模式对浙江近海的潮汐、潮流进行了数值模拟, 并采用网格嵌套技术对

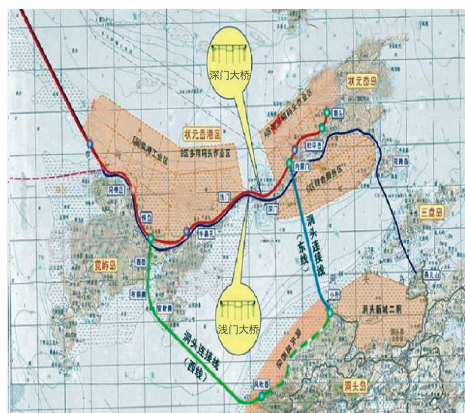


图1 跨海大桥桥位

Fig. 1 Position of sea-crossing bridges

收稿日期: 2012-09-11

基金项目: 重庆市自然科学基金(cstc2012jjA30002); 省部共建水利水运工程教育部重点实验室暨国家内河航道整治工程技术研究中心开放基金(SLK2012A02); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ110409)

作者简介: 倪志辉(1980-), 男, 湖南衡阳人, 副研究员, 博士, 主要从事河流海岸水动力学、环境及数值模拟方面的研究.

E-mail: benny251@163.com

原模式作了改进,得到了较高精度的结果. 龚政等^[10]基于平面二维潮流数学模型,采用网格嵌套技术,模拟了渤海、曹妃甸海域潮流场,取得较好效果.

以瓯江口的洞头峡大桥、深门大桥和浅门大桥为例(见图 1),考虑大桥桥位处瓯江口与温州湾相连接的河口区域,滩槽相间、水下地形复杂多变、受外海潮汐过程及温州下泄流量的共同作用,同时,研究区域中桥墩的尺寸很小,需采用细网格才能较为真实地反映桥墩附近的流场,因此考虑采用大、小模型嵌套的方法来展开研究. 由于大模型的计算范围较大,陆边界较为复杂,且河道狭窄、弯曲多变,因此主要采用无结构网格技术拟合计算区域的边界. 而小模型整个计算域为大桥桥墩附近的潮流动力,因此能够较好地模拟桥墩附近的细部流场.

1 大、小嵌套潮流模型

本文采用可以模拟复杂地形下多重动力因子耦合影响的潮流计算模型 MIKE21 来计算流场,以充分反映实际水域的复杂水动力条件.

1.1 数学模型的建立

为精确获得工程海域的水文动力环境特征,采用大小模型嵌套的方法对研究海域潮流进行模拟计算. 先利用数学模型对瓯江口大范围平面二维潮流状况进行模拟计算,研究现状条件下海域潮流动力分布特征;然后利用数学模型对工程区附近局部平面二维潮流状况进行模拟,研究大桥桥墩附近的潮流场变化.

瓯江口大范围(亦称“大区域”)平面二维潮流计算区域的范围为 120.6E–121.6E,27.4N–28.4N(见图 2(a)). 陆边界采用法向零通量的边界条件,工程海域上游边界采用温州站水位控制,外海开边界条件由东海潮波运动数学模型提供. 模型采用非结构三角形网格,可较好地贴合自然边界,提高计算精度和效率,并便于各种工程方案的准确布置. 工程海域网格剖分见图 2(b).

工程区附近局部(亦称“小区域”)平面二维潮流计算区域如图 3(a)所示. 外海开边界条件由瓯江口大范围计算区域潮流模型给出. 工程海域网格剖分如图 3(b)所示. 3 座桥梁桥位处细部网格剖分如图 4 所示.

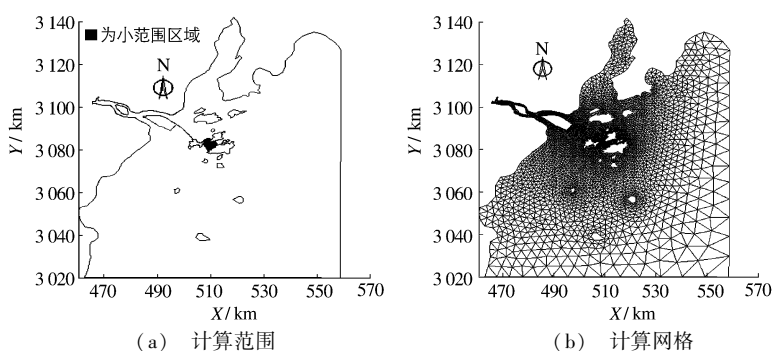


图 2 大区域计算范围和计算网格

Fig. 2 Large area calculation range and calculation mesh

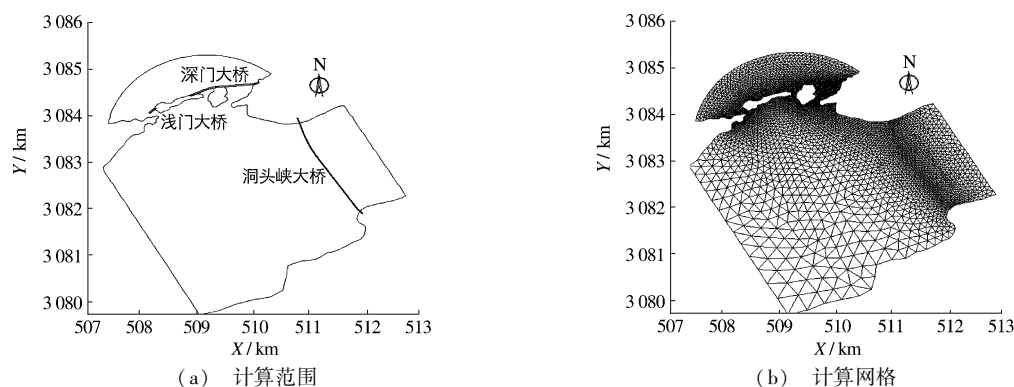


图 3 小区域计算范围和计算网格

Fig. 3 Small area calculation range and calculation mesh

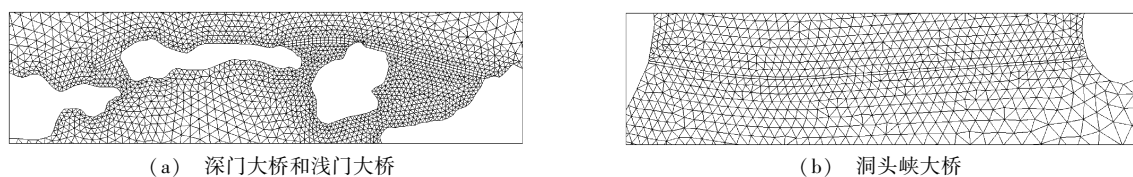


图4 深门大桥、浅门大桥和洞头峡大桥网格布置

Fig. 4 Shenmen bridge, Qianmen bridge and Dongtouxia bridge meshes

1.2 模型的求解方法及边界条件

计算中的陆边界,采用法向通量为零的边界条件,并使用切向的滑动边界条件,允许水流平行地沿着这些边界流动.在开边界上采用强迫边界条件,由水位、流量、水位流量关系来控制.岸滩边界采用干湿法模拟岸滩上的露滩和淹没过程.大、小模型均利用有限结点法对方程进行离散求解,采用SIMPLEC法进行求解.

计算中,紊动扩散系数取 $200 \text{ m}^2/\text{s}$;取糙率为 $0.015 \sim 0.035$.

2 模型验证

模型验证采用2010-01-15 09:00—2010-01-16 11:00大潮期水文实测资料.图5为洞头站潮位过程计算值与实测值的比较.图中黑点为实测值,实线为计算值,时间零点为2010-01-15 09:00.

从图5(a)可见,计算的潮位与实测值吻合程度较好.

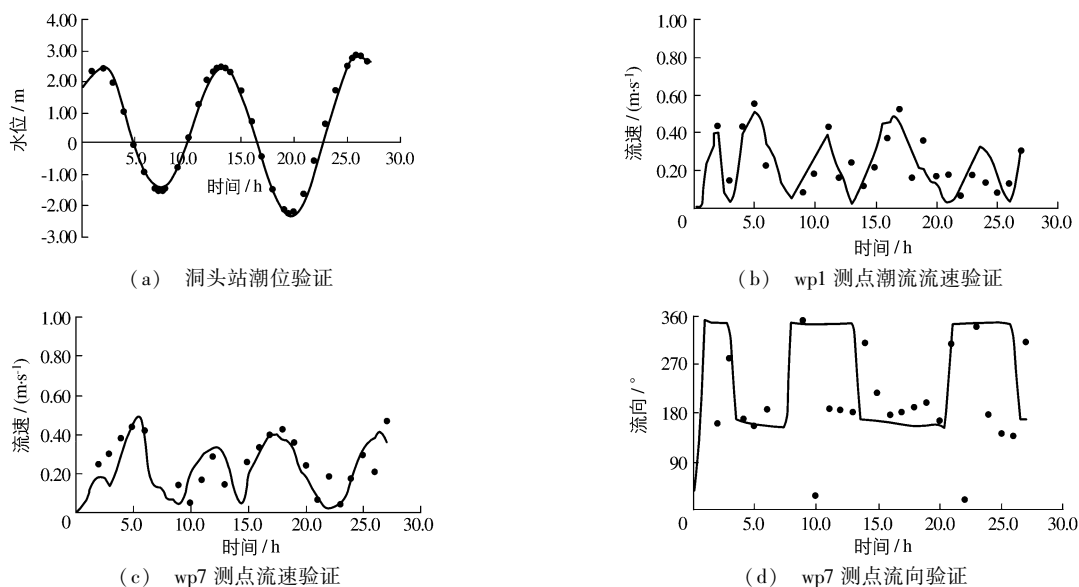


图5 测点潮位、流速和流向验证

Fig. 5 Tidal level verification of Dongtou station, velocity and flow verification of wp1 (wp7) points

数学模型验证有多个站点.为节省篇幅,本文仅列出部分站点的计算结果.图5(b)~(d)分别为wp1和wp7站点的流速流向验证.流向以东方向为起始方向,逆时针为正.图中实测值用黑点表示,计算值则采用实线表示.由图可见,各验证点计算流速和实测资料吻合较好,最大误差小于5%.表明二维数学模型可以真实复演工程海区的潮流传播过程和运动规律,同时证明采用的数学模型及其相关技术的实用性,模拟精度满足工程研究需要.

3 水流特征及流场分析

3.1 数学模型计算条件

大、小平面二维潮流数学模型计算采用的水文条件主要为大桥工程建设前后涨、落急 4 种情况,即一般的大、中、小潮和天文大潮,研究大桥工程修建前后桥墩附近的潮流场变化情况. 计算时间为 2010-01-10 00:00—2010-01-25 23:00 时,包括了大、中、小潮过程,共 384 h,时间步长为 15 min. 大潮过程中有水文及流速实测数据(2010-01-15 09:00—2010-01-16 11:00);天文大潮计算时间为 2010-01-30 00:00—2010-01-31 23:00.

3.2 工程海域局部潮流动力分布特征

根据大范围潮流动力分布计算结果,大桥工程实施后,远离大桥的海区潮流动力分布不受影响. 图 6 为小范围海域大潮涨急和落急时刻流场图. 由图可见:大桥工程的建成,大桥桥墩使该水道过水断面有一定的减小;该水道两侧通海,桥墩断面对水流流速影响不大,但由于桥梁压缩水流,致使桥下流速增大,水流挟沙能力增强,在桥下产生冲刷;此外,涨落潮流受到桥墩阻挡,桥墩周围的水流结构发生急剧变化,水流流线急剧弯曲,易导致桥墩局部冲刷,形成局部冲刷坑,桥墩间和桥墩四周将会被刷深.

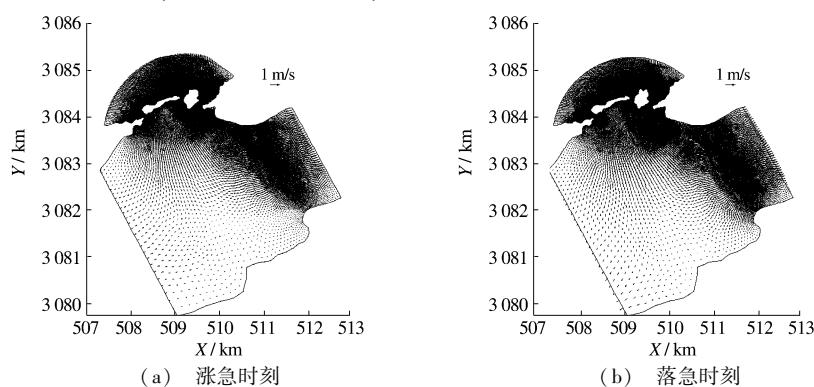


图 6 小范围大潮涨急和落急时刻流场

Fig. 6 High and low spring tidal currents of a small area

3.3 桥墩附近流场及潮位变化情况

由于桥区附近水域一般以落潮流为主流,且大潮期间涨落潮流速要强于小潮涨落潮流速. 数学模型计算结果表明,大桥建成后,在一般大潮时,各大桥桥墩处平均流速变化 0.008 m/s 以下,流向变化在 12.8° 以下,最大潮位变化在 0.136 m 以下;在天文大潮时,各大桥桥墩处平均流速变化在 0.01 m/s 以下,流向变化在 16.4° 以下,最大潮位变化在 0.151 m 以下. 由此可见,在一般大潮和天文大潮时,工程对桥区附近水域水流流速和潮位影响不大.

4 桥墩局部冲刷的计算

4.1 计算方法

1964 年我国公路、铁路部门根据我国各类河段 52 座桥梁 99 个站年的实测洪水资料和一般冲刷深度观测资料,制定了 65-2, 65-1 局部冲刷计算公式,而后《公路工程水文勘测设计规范》(JTG C30-2002)又对 65-1 公式进行了修正^[11]. 生产实践表明:这 2 种公式结构较为合理,反映了冲刷深度随近流速的变化关系,并考虑了床沙运动对冲刷深度的影响,计算数值较为稳定可靠. 2000 年美国行业标准中提出了“潮汐河道冲刷”的行业规范,是在世界范围内首次提出了潮汐水流下桥墩局部冲刷 HEC-18 式的工业应用规范^[12]. 梁森栋等^[13]结合某跨海大桥,使用 HEC-18 公式对其在潮流作用下复合桥墩的局部冲刷深度进行过研究. 故本

文采用 HEC-18 式进行桥墩局部冲刷深度计算,并与 65-2,65-1 修正公式计算结果作比较。

4.2 计算结果

根据数学模型的计算成果,洞头峡涨、落潮时,潮波通过各岛礁间的路线较为复杂,呈现出不同的流向,两涨两落的流向具有非对称性的特征.大小潮涨潮平均流速为 0.36 m/s,大小潮落潮平均流速为 0.47 m/s,大潮涨落急时的垂线平均流速分别为 0.77 和 0.87 m/s,小潮涨落急垂线平均流速分别为 0.37 和 0.61 m/s.桥区附近主流向与大桥轴线法向基本平行,大小潮涨潮垂线平均流向在 $225^{\circ} \sim 252^{\circ}$ 之间,大小潮落潮平均流向在 $43^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 之间(不包括平潮流向角度),大潮涨急垂线平均流向为 243° ,小潮涨急垂线平均流向为 237° ,大潮落急垂线平均流向为 50° ,小潮落急垂线平均流向为 43° .由以上资料,利用前面所述的桥墩局部冲刷计算方法,对桥墩冲刷进行计算和分析.图 7 为 3 种计算方法的桥墩局部冲刷的结果。

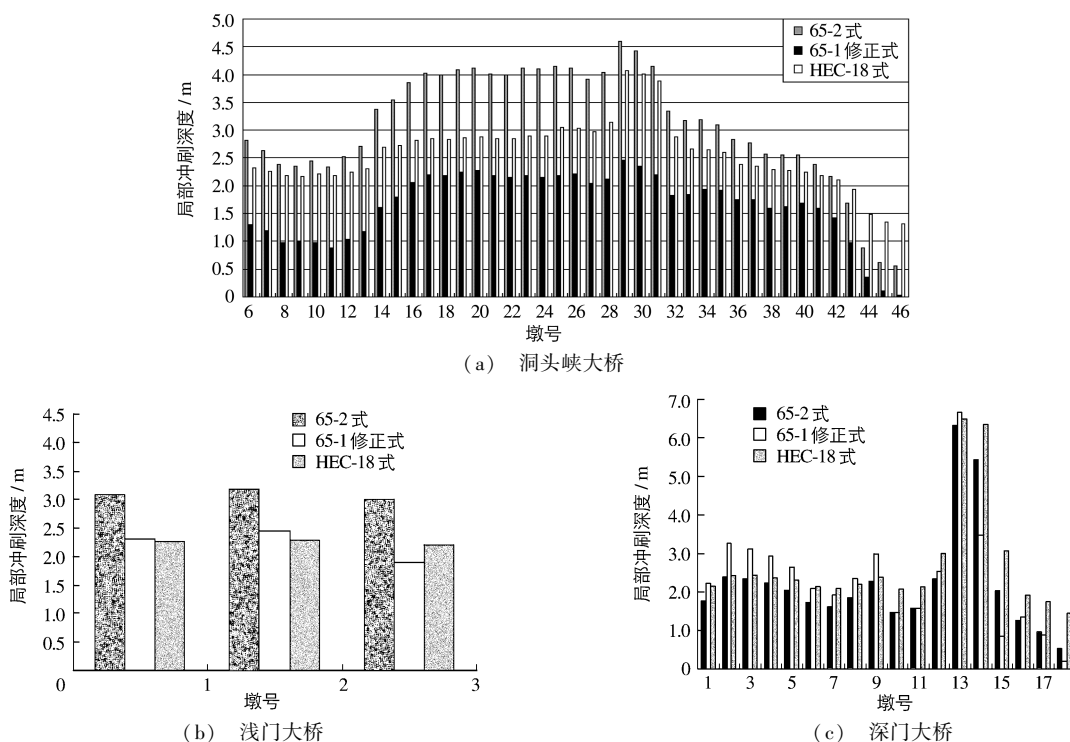


图 7 洞头峡大桥、浅门大桥和深门大桥桥墩局部冲刷计算结果

Fig. 7 Local scour of Dongtouxia bridge, Qianmen bridge and Shenmen bridge

4.3 可能最大局部冲刷深度位置

根据 65-2 式计算结果统计,洞头峡大桥各墩的局部冲刷深度为 0.56 ~ 4.59 m,深门大桥各墩的局部冲刷深度为 0.54 ~ 6.32 m;浅门大桥各墩的局部冲刷深度为 3.00 ~ 3.18 m.其中,洞头峡大桥可能最大局部冲刷深度为 4.59 m,29# ~ 31#主墩附近的冲刷最为严重.深门大桥可能最大局部冲刷深度在 13#主墩附近,为 6.32 m,14#主墩附近冲刷也非常严重.浅门大桥最大冲刷深度在 2#主墩附近,为 3.18 m.发生可能最大局部冲刷深度的桥墩均位于主墩深槽附近,这个结论与梁森栋^[13]等人的研究成果一致。

4.4 结果分析

从图 7 可见,局部冲刷的 3 种公式中,65-1 修正公式计算结果偏小,HEC-18 式和 65-2 式计算结果比较接近,均比 65-1 修正公式计算结果大,其中 65-2 式稍大.统计的最大可能冲刷深度是采用 65-2 式,计算结果最为不利.分析其原因:美国规范 HEC-18 式未考虑底质粒径,65-2 式是根据实测资料制定的,其适用的泥沙粒径范围为 0.1 ~ 78.0 mm.因此,出于工程偏安全考虑,65-2 式更适合预测河口海岸水域等潮流作用下的复合桥墩的局部冲刷深度,可为工程设计提供参考。

需要指出的是:实际情况下各桥墩达到最大冲刷深度所需要的时间不同,同时工程海域由于潮位存在周期性涨落,出现最大流速的时间并不能持续较长时间,且桥墩处出现最大流速的时刻与最高潮位的时刻不一定同步,从而难以形成最不利的水文条件.因此,在综合考虑上述因素的影响下,实际潮流作用下桥墩局部冲刷深度一般还是难以达到计算所得的理论最大冲刷深度.

5 结 语

根据现场实测资料,采用非结构三角网格对瓯江口海域洞头峡大桥、深门大桥和浅门大桥工程海区进行二维潮流数值模拟,分析了大桥建成后工程海区的动力分布特征、流场及潮位变化,并基于数值模拟结果计算了桥墩局部冲刷深度.

(1) 瓯江口洞头峡大桥、深门大桥和浅门大桥工程实施后,工程对桥区附近水流流速和潮位影响不大.

(2) 采用 65-2 式计算最大可能冲刷深度,所得的结果最为不利;65-2 式更适合预测河口海岸水域等潮流作用下的复合桥墩的局部冲刷深度.

(3) 桥墩发生可能最大局部冲刷深度的位置均位于主墩深槽附近,与前人结论一致.

(4) 大桥工程的建成,其桥墩使该水道过水断面有一定的减小.由于桥梁压缩水流,致使桥下流速增大,水流挟沙能力增强,在桥下产生局部冲刷.但在实际潮流作用下,桥墩最大冲刷深度一般难以达到计算所得的理论最大冲刷深度.

参 考 文 献:

- [1] 周玉利,王亚玲.桥墩局部冲刷深度的预测[J].西安公路交通大学学报,1999,19(4):48-50.(ZHOU Yu-li, WANG Ya-ling. Forecast of the bridge local scour depth[J]. Journal of Xi'an Traffic University, 1999, 19(4): 48-50. (in Chinese))
- [2] 齐梅兰.采沙河床桥墩冲刷研究[J].水利学报,2005,36(7):1-7.(QI Mei-lan. Riverbed scouring around bridge piers in river section with sand pits[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(7): 1-7. (in Chinese))
- [3] MELVILLE B W, COLEMAN S E. Bridge scour[M]. Colorado: Water Resources Publications, LLC, 2000.
- [4] SUMMER B M, WHITEHOUSE R J S, TORUM A. Scour around coastal structures: a summary of recent research[J]. Coastal Engineering, 2001, (44): 153-190.
- [5] COLEMAN S E. Clearwater local scour at complex piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(4): 330-334.
- [6] 唐士芳,李蓓.桩群阻力影响下的潮流数值模拟研究[J].中国港湾建设,2001,22(5):25-29.(TANG Shi-fang, LI Bei. Study on numerical simulation of tidal flow influenced by pile group resistance[J]. China Harbour Engineering, 2001, 22(5): 25-29. (in Chinese))
- [7] 唐士芳.二维潮流数值水槽的桩群数值模拟[J].中国港湾建设,2002,23(3):15-21.(TANG Shi-fang. Numerical simulation for pile group in numerical water flume of two dimensional tidal flow[J]. China Harbour Engineering, 2002, 23(3): 15-21. (in Chinese))
- [8] 王晓姝,张玮,廖鹏.上海近海风电场桩群对潮流影响研究[EB/OL]. <http://www.paper.edu.cn>. (2006-06-20)[2012-10-23]. (WANG Xiao-shu, ZHANG Wei, LIAO Peng. Study on tidal current around piers of shanghai offshore wind power plant[EB/OL]. <http://www.paper.edu.cn>. (2006-06-20)[2012-10-23]. (in Chinese))
- [9] 陈倩,黄大吉,章本照.浙江近海潮汐潮流的数值模拟[J].海洋学报,2003,25(5):9-20.(CHEN Qian, HUANG Da-ji, ZHANG Ben-zhao. Numerical simulation of tide and tidal currents in the seas adjacent to Zhejiang Province [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 25(5): 9-20. (in Chinese))
- [10] 龚政,张长宽,陶建峰,等.曹妃甸粉沙质海岸围垦后港内泥沙研究[J].海洋工程,2012,30(1):112-118.(GONG Zheng, ZHANG Chang-kuan, TAO Jian-feng, et al. Siltation in harbor basin after reclamation in Caofeidian silty coast[J]. The Ocean Engineering, 2012, 30(1): 112-118. (in Chinese))
- [11] JTG C30-2002,公路工程水文勘测设计规范[S].(JTG C30-2002, Hydrological specifications for survey and design of highway engineering[S]. (in Chinese))

- [12] HAN Yu-fang, CHEN Zhi-chang. Experimental study on local scour around bridge piers in tidal current[J]. China Ocean Engineering, 2004, 18(4): 669-676.
- [13] 梁森栋, 张永良. 大桥复合桥墩局部冲刷深度的计算分析[J]. 水利学报, 2011, 42(11): 1334-1340. (LIANG Sen-dong, ZHANG Yong-liang. Analysis on the local scour around complex piers of a sea-crossing bridge[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(11): 1334-1340. (in Chinese))

Local scour of composite piers under action of tidal current

NI Zhi-hui^{1,2}, WANG Ming-hui¹, ZHANG Xu-jin^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Southwestern Research Institute of Water Transportation Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China)

Abstract: The damage to bridges can be caused by scour around piers, so a more accurate calculation of pier scour depth is of great significance. In order to evaluate the scour depth accurately, unstructured grids are used and large and small models are nested to build a two-dimensional hydrodynamic numerical model. This model is calibrated using the measured tidal levels, current speed and current direction data. On this basis, the tidal power in the sea area is also studied, and the influence around the bridge project is analyzed, and the local scour of many cross-sea bridge piers is calculated by introducing some reliable formulas, which are the pier local scour formula 65-2 and the modified 65-1, the existing norms recommended in China, and the formula HEC-18, recommended in USA industry standards. The results show that the construction of bridges has a little impact on the tidal current in the bridge area and the the largest possible local scour depth occurs in the main pier of the main bridge.

Key words: composite piers; local scour; mathematical model; sea-crossing bridge; local scour formula of pier

江苏科兴监理公司监理项目荣获国家优质工程奖

江苏科兴监理公司监理项目京杭运河泗阳三线船闸工程荣获国家优质工程奖银奖,此前该项目已获交通运输部“水运交通优质工程奖”和省优“扬子杯”。

近年来,公司坚持以“创建内河一流水运工程监理企业为目标”进行品牌战略管理,充分发挥国家级科研院所属科技企业优势,建立内河水运施工监理项目管理模版,加强技术研究及总结提炼,参加了京杭运河皂河船闸、泗阳三线船闸、施桥三线船闸、芜申线杨家湾船闸、下坝船闸,连申线新沂河枢纽、海安船闸、新团船闸及湖北引江济汉高石碑船闸,山东邓楼船闸,浙江富春江船闸,江苏杨林塘船闸和新夏港船闸等多个船闸枢纽工程的施工监理,获得多个国家及省部级奖项。

面对成绩,科兴监理公司将再接再厉,团结一致,促进公司发展上升新的台阶,为我国的工程建设事业做出新的贡献。

摘自南京水利科学研究院网站